

Radosław FIGURA¹
Leszek SZYCHTA²
Kamil KIRAGA³

METODY WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA SPRAWNOŚCI SILNIKA KLATKOWEGO WSPÓŁPRACUJĄCEGO Z POMPĄ ODŚRODKOWĄ

Silniki klatkowe powszechnie stosowane są w przemyśle. Sprawność z jaką pracują silniki bezpośrednio wpływa na energochłonności procesów przemysłowych w których są wykorzystywane. W artykule zaprezentowano wybrane metody estymacji współczynnika sprawności pod kątem wykorzystania w systemach sterowania zestawami pompowymi. Podano również podstawowe zależności na wyznaczenie strat mocy w silniku klatkowym.

AN INDUCTION CAGE MOTOR EFFICIENCY ESTIMATION METHOD OF A PUMP SET WORKING

Induction cage motors are common used in industry. The motor efficiency is effect directly for energy consumption of industrial process. In the paper the selected methods of motor efficiency estimating are shown. The selected power losses of induction cage motor and method of calculated power losses are presented.

1. WSTĘP

Stosowanie energooszczędnych systemów sterowania powoduje zmniejszenie energochłonności procesów przemysłowych obniżając koszty eksploatacyjne [2,3,4]. Miarą energochłonności procesów pompowania jest jednostkowy współczynnik energochłonności, który zależy od wysokości podnoszenia wody w zestawie pompowym oraz od chwilowego współczynnika sprawności poszczególnych zespołów pompowych [4,13]. Współczynnik sprawności zespołu pompowego jest iloczynem współczynników sprawności: pompy, silnika oraz przemiennika częstotliwości. Systemy sterowania pracą pompowni charakteryzujące się wysokim współczynnikiem efektywności energetycznej powinny tak dobierać punkt pracy pompy, silnika oraz przemiennika częstotliwości aby urządzenia te pracowały w przedziale najwyższych sprawności [4,5,12,13].

¹Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
Tel.: + 48 48 361-77-49, Fax: + 48 48 361-77-24, e-mail: r.figura@pr.radom.pl

²Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
Tel.: + 48 48 361-77-35, Fax: + 48 48 361-77-24, e-mail: l.szychta@pr.radom.pl

³Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
Tel.: + 48 48 361-77-49, Fax: + 48 48 361-77-24, e-mail: k.kiraga@pr.radom.pl

Wyznaczenie współczynnika sprawności η silnika klatkowego było przedmiotem wielu opracowań. Powstało ponad trzydzieści metod wyznaczania wartości współczynnika sprawności η [1]. Współczynnik sprawności η definiowany jest jako stosunek mocy P_2 na wale silnika do mocy czynnej P_1 pobranej przez silnik [9,11]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

gdzie: P_1 - moc czynna pobrana przez silnik
 P_2 - moc czynna oddana przez silnik
 η - współczynnik sprawności silnika

Poszczególne metody różnią się między sobą sposobem wyznaczenia mocy P_2 , którą można określić następującą zależnością:

$$P_2 = T\omega_r \quad (2)$$

gdzie: T - moment obrotowy na wale silnika
 ω_r - prędkość kątowna wału silnika

Jak wynika z zależności (2) jednym ze sposobów wyznaczenia mocy P_2 jest odczyt momentu T na wale silnika oraz prędkości kątownej wału ω_r . Niestety odczyt momentu T w pracujących aplikacjach wiąże się z modyfikacją mechaniczną układu napędowego. Nakład pracy i koszty z tym związane mogą być dużo wyższe niż oczekiwane zyski. Jako rozwiązanie alternatywne można zastosować estymację wartości momentu T na wale silnika i na tej podstawie wyznaczać wartość chwilową współczynnika sprawności η . Niektóre z opracowanych metod polegają na wyznaczeniu sumy strat mocy $\sum\Delta P$ w silniku, co pozwala określić moc P_2 na wale silnika. W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane metody estymacji współczynnika sprawności silnika.

2. STRATY MOCY W SILNIKU INDUKCYJNYM KLATKOWYM

Moc P_2 na wale silnika w stosunku do mocy czynnej P_1 pobranej przez silnik ze źródła zasilania jest mniejsza o powstałą w silniku sumę strat mocy $\sum\Delta P$:

$$P_2 = P_1 - \sum\Delta P \quad (3)$$

Przyjmuje się, że suma strat mocy $\sum\Delta P$ zawiera pięć cząstkowych strat mocy (rys. 1), wśród których można wyróżnić straty mocy w uzwojeniu stojana ΔP_{Cu1} , straty mocy w uzwojeniu wirnika ΔP_{Cu2} , straty mocy w rdzeniu silnika ΔP_{Fe} , straty mechaniczne ΔP_m oraz dodatkowe straty obciążeniowe ΔP_{dod} :

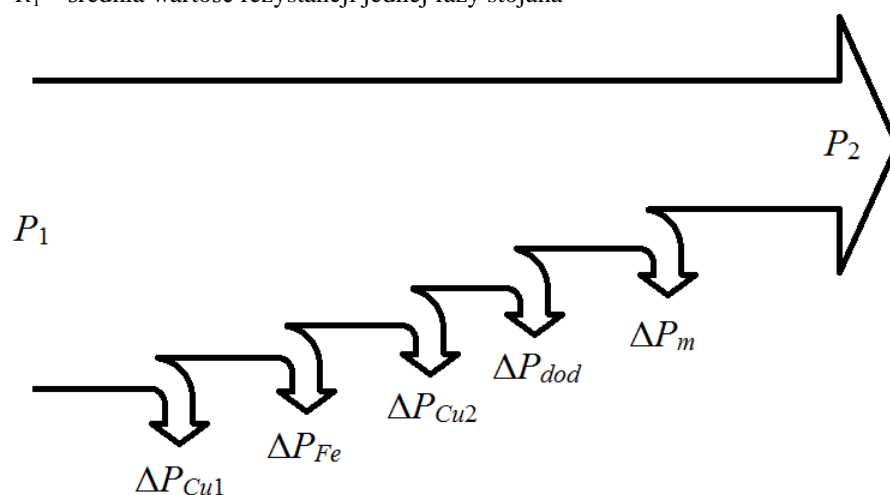
$$\sum\Delta P = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_{dod} \quad (4)$$

2.1 Straty mocy w uzwojeniu stojana

Straty w uzwojeniu stojana ΔP_{Cu1} reprezentują konwersję energii elektrycznej w ciepłą wskutek przepływu prądu I_1 przez uzwojenie stojana. Dla silnika indukcyjnego trójfazowego wielkość strat ΔP_{Cu1} określona jest zależnością:

$$\Delta P_{Cu1} = 3I_1^2 R_1 \quad (5)$$

gdzie: I_1 - skuteczna wartość prądu fazowego uzwojenia stojana
 R_1 - średnia wartość rezystancji jednej fazy stojana



Rys. 1. Bilans energetyczny silnika indukcyjnego klatkowego

2.2 Straty mocy w uzwojeniu wirnika

Straty mocy w uzwojeniu wirnika ΔP_{Cu2} wraz ze stratami mocy w uzwojeniu stojana ΔP_{Cu1} określone są jako straty mocy w miedzi ΔP_{Cu} :

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} \quad (6)$$

Straty mocy ΔP_{Cu2} są proporcjonalne do kwadratu prądu I_2 płynącego przez jedną fazę uzwojenia wirnika o średniej rezystancji R_2 . Dla silnika trójfazowego wielkość strat ΔP_{Cu2} określona jest zależnością:

$$\Delta P_{Cu2} = 3I_2^2 R_2 \quad (7)$$

Straty mocy w miedzi zależą nie tylko od prądu płynącego przez uzwojenie, ale także zmieniają się wraz ze zmianą rezystancji uzwojenia. Przy zmiennym obciążeniu silnika, zmiana rezystancji uzwojenia wykonanego z miedzi może wahać się w granicach 10%

2.3 Straty mocy w rdzeniu silnika

Materiał magnetyczny umieszczony w obszarze działania zmiennego pola magnetycznego, nagrzewa się. Straty mocy w rdzeniu ΔP_{Fe} można podzielić na dwie składowe (8). Są to straty powstałe wskutek pojawienia się prądów wirowych ΔP_w oraz tzw. straty histerezy ΔP_h powstające w wyniku magnesowania i rozmagnesowywania rdzenia silnika [7].

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_w + \Delta P_h \quad (8)$$

Straty histerezy ΔP_h wzrastają wraz z częstotliwością f napięcia zasilania oraz z kwadratem indukcji magnetycznej B :

$$\Delta P_h = C_h B^2 f \quad (9)$$

gdzie: C_h - współczynnik strat z histerezy

Straty wiroprowodowe ΔP_w rosną wraz z kwadratem częstotliwości f napięcia zasilania oraz z kwadratem indukcji magnetycznej B :

$$\Delta P_w = C_w B^2 f^2 \quad (10)$$

gdzie: C_w - współczynnik strat wiroprowodowych

2.4 Straty mechaniczne

Straty mechaniczne ΔP_m powstają w wyniku tarcia wału w łożyskach oraz tarcia części wirujących silnika o powietrze. Przybliżoną wartość strat mechanicznych można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta P_m \approx (a_1 \mu F + a_2) n^2 \quad (11)$$

gdzie: μ - współczynnik tarcia

F - siła docisku

n - prędkość obrotowa wału maszyny

a_1, a_2 - współczynniki stałe dla danej maszyny

Na podstawie zależności (10) można przyjąć, że straty mechaniczne rosną wraz z kwadratem prędkości obrotowej wirnika silnika klatkowego.

2.5 Dodatkowe straty obciążeniowe

Dodatkowe straty obciążeniowe ΔP_{dod} powstają w wyniku pojawiania się wyższych harmonicznych prądu w uzwojeniu stojana oraz uzwojeniu wirnika silnika klatkowego. Przyjmuje się, że dodatkowe straty obciążeniowe ΔP_{dod} są proporcjonalne do kwadratu prądu wirnika I_2 .

$$\Delta P_{dod} \propto I_2^2 \quad (12)$$

Suma wszystkich strat mocy umożliwia określenie wartości mocy na wale silnika (3) oraz wartości współczynnika sprawności (1). Niektóre metody estymacji współczynnika sprawności wykorzystują rachunek strat mocy. Wśród wielu proponowanych rozwiązań można znaleźć metody o skomplikowanych obliczeniach, wymagające instalowania przy silniku dodatkowych przetworników pomiarowych, wykonywania dodatkowych prób takich jak próba biegu jałowego, czy próba zwarcia silnika. Istnieją jednak sposoby mniej ingerujące w silnik, pozwalające na wyznaczenie mocy P_2 silnika oraz współczynnika sprawności η . W przypadku estymacji współczynnika sprawności w energooszczędnych systemach sterowania pracą zastawu pompowego, poszukiwane są metody jak najmniej ingerujące w układ napędowy. Wynika to z konstrukcji zespołów pompowych, w których zainstalowanie momentomierza na wale silnika wymaga przerobienia konstrukcji łączącej silnik z pompą, co powoduje zwiększenie wymiarów zespołu pompowego oraz podnosi koszty inwestycyjne przedsięwzięcia.

3. WYBRANE METODY WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA SPRAWNOŚCI

Wyznaczenie współczynnika sprawności może odbywać się z wykorzystaniem kilku lub kilkunastu danych pomiarowych takich jak:

- a) parametry znamionowe silnika odczytane z tabliczki znamionowej,
- b) prędkość obrotowa wirnika,
- c) prąd przewodowy uzwojenia stojana,
- d) napięcie zasilające uzwojenie stojana,
- e) moc czynna pobrana przez silnik,
- f) wartość rezystancji jednej fazy stojana,
- g) temperatura uzwojeń stojana,
- h) napięcie i prąd w uzwojeniu stojana, moc czynna pobrana przez silnik oraz prędkość obrotowa podczas próby biegu jałowego oraz próby zwarcia silnika,
- i) pomiar momentu napędowego na wale silnika,
- j) pomiar częstotliwości itp.

Z reguły pozyskanie większej ilości danych pomiarowych pozwala na osiągnięcie większej dokładności estymacji współczynnika sprawności η . Jednak większa liczba mierzonych wielkości oznacza większe koszty inwestycyjne, a czasem jest niemożliwa, szczególnie w przypadku eksploatowanych już silników.

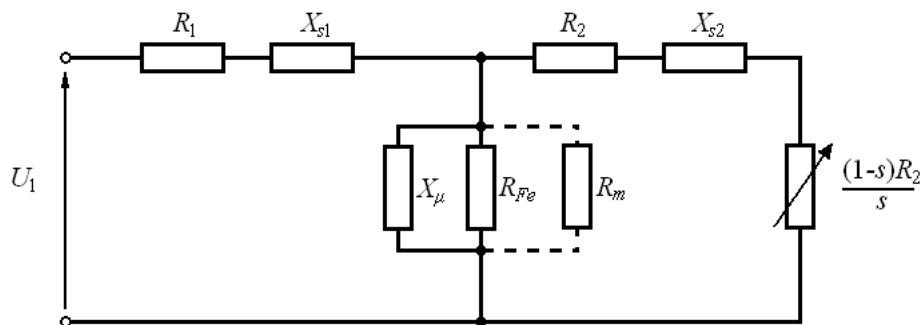
3.1. Metody wyznaczania cząstkowych strat mocy

Do tej grupy metod zalicza się metodę E1 z IEEE Standard 112-1996 [8,10]. Zastosowanie tej metody obliczeniowej wymaga wykonania próby biegu jałowego silnika oraz kilku prób obciążenia silnika dla wartości obciążeń między 25% a 150% mocy znamionowej. Wiąże się to z koniecznością demontażu silnika i wykonania szczegółowych badań w warunkach laboratoryjnych umożliwiających zmianę momentu T na wale silnika przy zmiennych wartościach napięcia zasilania. W celu wyznaczenia współczynnika sprawności η odczytuje się wartości mocy czynnej pobranej przez silnik, wartości napięć międzyfazowych i prądów fazowych, temperatury uzwojeń oraz prędkości obrotowej wału. Określone są następnie wartości cząstkowych strat mocy w silniku. W większości przypadków metoda ta nie sprawdza się w praktyce ze względu na konieczność wykonania badań silnika w laboratorium specjalistycznym.

Uproszczeniem metody E1 jest propozycja wyznaczenia współczynnika sprawności zaproponowana przez firmę Ontario Hydro [8]. Wyeliminowano konieczność wykonania próby biegu jałowego zakładając, że suma strat mechanicznych oraz strat w rdzeniu przyjmuje wartość 3,5% mocy znamionowej. Dodatkowe straty obciążeniowe wyznaczone są według algorytmu zawartego w metodzie IEEE Standard 112-1996 metoda E1. Jedynymi wielkościami mierzonymi, na podstawie których wykonywana jest estymacja sprawności silnika są moc czynna pobrana przez silnik oraz prędkość obrotowa wirnika. Potwierdzony eksperymentalnie błąd estymacji sprawności mieści się w granicach 3 do 4% [8].

3.2. Metody obliczania współczynnika sprawności na podstawie schematu zastępczego silnika

Metody należące do tej kategorii polegają na wykorzystaniu schematu zastępczego silnika klatkowego (rys. 2) do wyznaczenia współczynnika sprawności.



Rys. 2. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego klatkowego

Metody te wymagają wyznaczenia parametrów schematu zastępczego takich jak:

- rezystancja uzwojenia stojana – R_1
- rezystancja uzwojenia wirnika – R_2

- rezystancja rdzenia silnika – R_{Fe}
- rezystancja odpowiadająca stratom mechanicznym – R_m
- reaktancja uzwojenia stojana – X_{s1}
- reaktancja uzwojenia wirnika – X_{s2}
- reaktancja rdzenia silnika – X_μ

Większości metod w tej kategorii istnieje potrzeba wykonania próby biegu jałowego lub próby zwarcia silnika. Do metod tych można zaliczyć [8]:

- metodę F1 z IEEE standard 112-1996
- Ontario Hydro's simplified metod F1 – uproszczoną metodę F1
- metodę podwójnego obwodu wirnika
- metodę pomiaru impedancji silnika
- wyznaczenie parametrów schematu zastępczego na podstawie wartości umieszczonych na tabliczce znamionowej

Zastosowanie tych metod w przypadku estymacji współczynnika sprawności silnika napędzającego pompę odśrodkową, jest utrudnione ze względu na ograniczone możliwości ingerencji w połączenie silnik-pompa w zespole pompowym.

3.3. Metody wykorzystujące pośredni pomiar poślizgu

Podstawowa metoda wykorzystująca pośredni pomiar poślizgu polega na pomiarze prędkości obrotowej n wału silnika i wyznaczeniu poślizgu s z zależności [8,10]:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (13)$$

gdzie: n_1 – prędkość synchroniczna silnika

Do wyznaczenia współczynnika sprawności η konieczne jest wyznaczenie również mocy czynnej P_1 pobranej przez silnik. Wartość współczynnika sprawności wyznacza się z zależności:

$$\eta = \frac{\frac{s}{s_N} P_N}{P_1} \quad (14)$$

gdzie: s_N – poślizg nominalny wyznaczony na podstawie prędkości nominalnej n_N
 P_N – nominalna moc na wale silnika

Powyższa metoda charakteryzuje się prostymi do zrealizowania obliczeniami. W łatwy sposób można wyznaczyć sprawność silnika, ale błąd estymacji współczynnika sprawności η podstawową metodą pośredniego pomiaru poślizgu osiąga wartość nawet 40%.

Równie nieskomplikowaną w obliczeniach metodą jest metoda prądowa [8,10]. Wymagane jest jednak wykonanie próby biegu jałowego w celu określenia wartości prądu

stanu jałowego I_0 . Do wyznaczenia współczynnika sprawności konieczny jest pomiar prądu fazowego I_1 oraz mocy czynnej P_1 pobranej przez silnik. Współczynnik sprawności η określony jest zależnością:

$$\eta = \frac{(2I_1 - I_0)P_N}{(2I_N - I_0)P_1} \quad (15)$$

gdzie: I_N – nominalny prąd przewodowy silnika

Ze względu na nieliniowość prądu I_1 w stosunku do mocy oddanej P_2 na wale silnika metoda ta charakteryzuje się małą dokładnością, porównywalną z dokładnością metody pośredniego pomiaru poślizgu.

3.4. Inne metody wyznaczania współczynnika sprawności

Na podstawie badań eksperymentalnych firma ABB określiła straty mocy ΔP w silniku indukcyjnym klatkowym. Uzależniając otrzymane wartości od częstotliwości f napięcia zasilania silnika oraz od momentu T_2 występującego na wale silnika otrzymano zależność [6,13]:

$$\Delta P = 0,2\Delta P_N + 0,15\left(\frac{f}{f_N}\right)^2 \Delta P_N + 0,65\left(\frac{T}{T_N}\right)^2 \Delta P_N \quad (16)$$

gdzie: f_N – nominalna częstotliwość napięcia zasilania

f – częstotliwość napięcia zasilania

T_N – nominalny moment obrotowy na wale silnika

T – moment obrotowy na wale silnika

ΔP_N – straty mocy przy nominalnych parametrach pracy

Funkcja określająca straty mocy silnika (16) wykorzystywana jest w ogólnodostępnym oprogramowaniu służącym do doboru mocy silników do pomp. Podstawiając wyznaczone straty mocy ΔP silnika (16) do zależności (3) oraz (1) można określić współczynnik sprawności silnika.

W pracy [13] korzystając z zależności (16) wyznaczono funkcję $\eta=f(f,W)$ estymującą współczynnik sprawności w zależności od częstotliwości f napięcia zasilającego silnik oraz od współczynnika dopasowania W mocy silnika do mocy pompy:

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(0,2\left(\frac{f_N}{f}\right)^3 + 0,15\frac{f_N}{f} + 0,65W^2\frac{f}{f_N} \right) \frac{1-\eta_N}{W\eta_N}} \quad (17)$$

gdzie: η_N – nominalny współczynnik sprawności silnika

Funkcję $\eta=f(f,W)$ wykorzystano do estymacji współczynnika sprawności silnika indukcyjnego klatkowego pracującego w zespole pompowym o regulowanej prędkości obrotowej. Otrzymane wartości współczynnika sprawności różniły się od pomierzonych w warunkach laboratoryjnych [6]. Wykorzystanie funkcji $\eta=f(f,W)$ do estymacji współczynnika sprawności przy pracy zespołu pompowego ze stałą wysokością podnoszenia H powoduje powstanie błędu estymacji powyżej 10%. Błąd estymacji zwiększa się wraz ze zmniejszaniem częstotliwości napięcia zasilania silnika.

3. WNIOSKI

Poprawa efektywności procesów pompowania wiąże się z maksymalizacją współczynnika sprawności zestawu pompowego. Energooszczędne systemy sterowania pracą pomp, wyznaczając chwilowy współczynnik sprawności silnika, mogą tak dobierać punkt jego pracy, aby osiągnąć najniższą energochłonność. Z zaprezentowanych metod można wyróżnić metody statyczne oraz dynamiczne wyznaczania współczynnika sprawności. Metody dynamiczne umożliwiają określanie współczynnika sprawności w trakcie pracy silnika. Metody wymagające demontażu silnika w celu wykonania szczegółowych prób biegu jałowego, zwarcia oraz obciążenia silnika są kłopotliwe do zastosowania w systemach sterowania zestawami pompowymi. Metody wymagające pomiaru prędkości obrotowej wału wymuszają konieczność montowania dodatkowego przetwornika pomiarowego, co wiąże się z modyfikacją mechaniczną zespołu pompowego. Najmniej inwazyjne metody wyznaczania współczynnika sprawności silnika pracującego w zespole pompowym wykorzystują pomiar wielkości elektrycznych po stronie stojana silnika. Do wielkości mierzonych należą: skuteczna wartość napięcia międzyprzewodowego, wartość skuteczna prądu przewodowego, moc czynna pobrana przez silnik oraz częstotliwość napięcia zasilania silnika. W systemach sterowania, w których silniki zasilane są z przemienników częstotliwości, pozyskanie powyższych danych wymaga jedynie odczytu wartości tych parametrów z przemiennika częstotliwości.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Castrillon R, Oslinger J. L.: *In-field induction motor efficiency determination methods in the scope of efficiency-based meintance*, Cali, Colombia, 2008.
- [2] Figura R., Szychta L.: *Energochłonność pompowania wody podczas nawadniania pól golfowych*, XI Międzynarodowa Konferencja Komputerowe Systemy Wspomagania Nauki, Przemysłu i Transportu TRANSCOMP, 2007.
- [3] Figura R., Szychta L.: *Energooszczędne pompowanie wody w deszczowniach wielkoobszarowych – Pompy Pompownie*, 2008.
- [4] Figura R., Szychta L.: *Energy-saving pumping water in irrigational systems, Computer Systems aided science and engineering work in transport, mechanics and electrical engineering*, n.121, 269-274, 2008.
- [5] Figura R., Szychta E., Szychta L., Kwiecień R.: *Analiza istotności krzywych aproksymujących współczynnik sprawności silnika indukcyjnego klatkowego*, Transport Miejski i Regionalny, Gdańsk 2009
- [6] Figura R., Szychta L., Kwiecień R.: *Aproksymacja krzywych sprawności silnika indukcyjnego klatkowego współpracującego z pompą odśrodkową*, IX Konferencja

- Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym "SENE 2009", Łódź 18-20 listopada 2009
- [7] Kaczmarek M., Amar M., Protat F.: *Iron loss under PWM voltage supply on Epstein Frome and induction motor core*, *Transaction on Magnetics*, n. 1, 189-194, 1996.
 - [8] Kueck J.D.: *Development of a method for estimating motor efficiency and analyzing motor condition*, in *Process IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 1998.
 - [9] Latek W., *Teoria maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1982.
 - [10] Lu B., Habetler T. G. Harley R. G.: *A survey of efficiency estimation methods of in-service induction motors with considerations of condition monitoring requirements*, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 42, 2006.
 - [11] Orłowska-Kowalska T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
 - [12] Sychta E., Luft M., Sychta L.: *Method of designing ZVS boost converter*, *Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 1-3 September 2008, Poznań.
 - [13] Sychta L.: *Zasady doboru systemu sterowania pompowni wodociągowych*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2006.